

22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique

Lyon, 24 au 28 Août 2015

# Imagerie acoustique instationnaire par retournement temporel en environnement complexe

S. LOBRÉAU<sup>a</sup>, É. BAVU<sup>b</sup>, M. MELON<sup>c</sup>

- a. Cnam Paris, LMSSC (EA3196), 292 rue Saint-Martin, F-75141 Paris Cedex 3,  
France - [stephanie.lobreau@cnam.fr](mailto:stephanie.lobreau@cnam.fr)
- b. Cnam Paris, LMSSC (EA3196), 292 rue Saint-Martin, F-75141 Paris Cedex 3,  
France - [eric.bavu@cnam.fr](mailto:eric.bavu@cnam.fr)
- c. LAUM UMR CNRS 6613, Avenue olivier Messiaen, F-72085 Le Mans cedex 9,  
France - [manuel.melon@univ-lemans.fr](mailto:manuel.melon@univ-lemans.fr)

## Résumé :

*Le processus d'imagerie par retournement temporel est une technique largement utilisée pour réaliser de la localisation et caractérisation de source acoustique. Dans ce papier, différentes améliorations sont proposées afin que l'efficacité et la précision de cette technique d'imagerie instationnaire soient indépendantes des conditions de mesure. Les différentes améliorations proposées ont été développées en tirant avantage de l'utilisation d'une antenne de mesure hémisphérique double-couche, permettant l'enregistrement simultanée du champ de pression et de sa dérivée normale. Le processus d'imagerie par retournement temporel a été optimisé dans le but de reconstruire un champ de pression avec une grande précision temps-espace et une qualité de haute résolution. Une étude expérimentale menée en chambre réverbérante et bruitée (faible rapport signal-à-bruit) met en évidence la capacité de la méthode proposée pour rétro-propager, avec une grande précision temps-espace, un champ de pression rayonné par une source acoustique instationnaire présente dans un volume délimité par une surface de mesure.*

## Abstract :

The time reversal imaging process is a widely technique used for source localization and characterization. In this paper, several improvements are proposed allowing to use efficiently this imaging method whatever the measurements conditions, even if the environment is highly reverberant and noisy. All of the improvements was developed taking advantage of the use of a hemispherical array using pressure-pressure probes, giving acces to he sound pressure field and its normal derivative. The proposed time reversal method was optimized to reconstruct a sound pressure field precisely both in time and space domains with a high resolution. An experiment led in a reverberant and

noisy room (poor signal-to-noise ratio) demonstrates the ability of the proposed method to back-propagate acoustic waves radiated from a non-stationary source in the volume delimited by the measurement array with a high precision both in time and space domains.

**Mots clefs : imagerie acoustique, retournement temporel, source instationnaire**

## 1 Introduction

Le processus d'imagerie acoustique instationnaire par retournement temporel permet une reconstruction de champ de pression précise et efficace dans les domaines du temps et de l'espace. Cette technique est principalement basée sur un principe d'invariance [1]. En effet, en considérant le champ de pression  $p(\vec{r}, t)$  comme étant solution de l'équation des ondes, le champ de pression renversé dans le temps  $p(\vec{r}, -t)$  l'est également. La précision des techniques d'imagerie repose essentiellement sur la connaissance des fonctions de Green décrivant l'environnement de mesure. D'une manière générale, faisant entre autres intervenir des effets de salle, il est presque impossible d'obtenir des propagateurs correspondant à l'environnement réel. Dans ce papier, il est donc proposé de transformer ce problème compliqué (faisant intervenir de la réverbération et l'influence de sources perturbatrices) en un cas simple (cas de champ libre et non bruité). Pour cela, la stratégie adoptée est l'utilisation d'une méthode de séparation de champs. Cette technique permet alors de reconstruire le champ de pression tel qu'il aurait été mesuré en environnement anéchoïque sans sources perturbatrices.

## 2 Les méthodes

Les différentes étapes du processus d'imagerie par retournement temporel sont présentées à la figure 1 et seront détaillées dans la suite de ce papier.

### 2.1 Le retournement temporel

Le processus d'imagerie par retournement temporel se décompose en deux grandes phases 2. La première étape est réalisée dans le milieu réel de propagation. Elle repose sur la captation et l'enregistrement de double données (pression-pression dans notre cas) grâce à l'utilisation de sondes pression-pression montées sur une antenne hémisphérique. Ce jeu de données est ensuite, dans la seconde phase du processus, renversé temporellement et est ré-émis numérique dans l'environnement modélisé. Ce travail de reconstruction de champ de pression rayonné est réalisé de manière entièrement numérique.

Le champ de pression est reconstruit en chaque point  $\vec{r}$  du volume délimité par

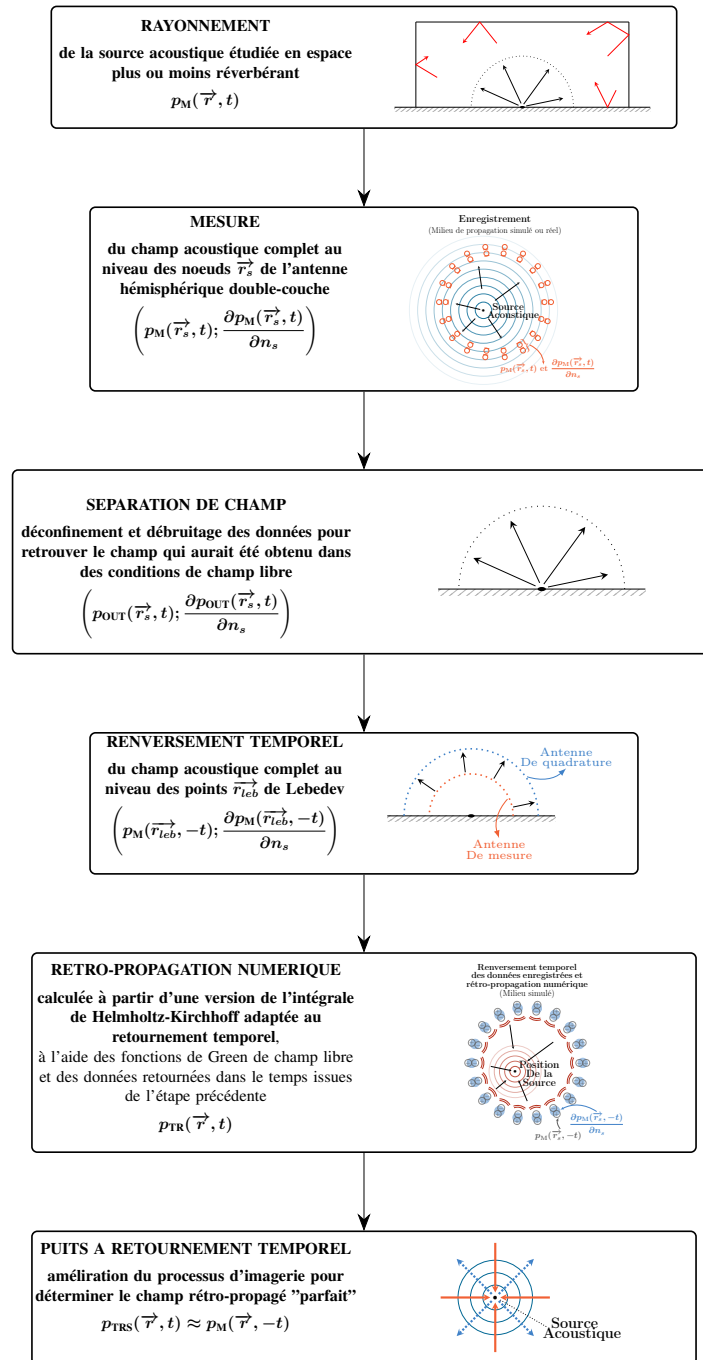


Figure 1: Processus d'imagerie par retournement temporel utilisant une antenne hémisphérique double-couche en environnement fortement réverbérant et bruité

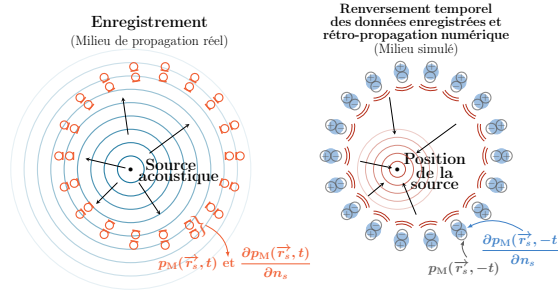


Figure 2: Principe du processus d'imagerie acoustique par retournement temporel - gauche : émission et enregistrement du double jeu de données ; droite : reconstruction du champ de pression rayonné par la source d'intérêt

la surface de mesures via le calcul de l'intégrale de Helmholtz-Kirchhoff modifiée (Eq. 1). Cette relation repose notamment sur la connaissance du champ de pression complet, directement accessible grâce à l'utilisation d'une antenne double couche, en chaque point  $\vec{r}_s$  de la surface de captation. Pour la détermination de cette intégrale, dépendant également de la connaissance de la fonction de Green et de sa dérivée normale, il est donc indispensable de pouvoir modéliser parfaitement l'environnement de propagation.

$$p_{TR}(\vec{r}, t) = \iint_S \left( G(\vec{r}_s, \vec{r}, T-t) \frac{\partial p(\vec{r}_s, T-t)}{\partial n_s} - \frac{\partial G(\vec{r}_s, \vec{r}, T-t)}{\partial n_s} p(\vec{r}_s, T-t) \right) . dS \quad (1)$$

### 2.3 Séparation de champ

Cherchant à optimiser les techniques d'imagerie acoustique par retournement temporel, la première amélioration proposée consiste à rendre la qualité de reconstruction temps-espace indépendante des conditions de mesures. Pour cela, nous proposons de modifier un problème réel complexe (environnement réel bruité et fortement réverbérant) en un problème numérique simple (environnement simulé non bruité et anéchoïque) [2] [3]. Il s'agit alors, par un calcul de séparation de champs, de reconstruire distinctement le champ rayonné par la source d'intérêt et l'ensemble des contributions issues à la fois des sources perturbatrices et de la réverbération.

À partir du double jeu de données enregistré,  $p(a_1, \theta, \phi)$  et  $p(a_2, \theta, \phi)$ , sur les deux couches de l'antenne hémisphérique (dont le rayon de la couche interne est  $a_1 = 14.5$  cm et le rayon de la couche externe est  $a_2 = 17.5$  cm), il est possible de reconstruire le champ rayonné par la source d'intérêt tel qu'il aurait été mesuré dans des conditions de champ libre (Eq. 2). Pour cela, nous projetons ces données sur la base des harmoniques sphériques  $Y_n^m$ . L'utilisation de la fonction de Hankel sphérique  $h_n^{(2)}$  donne directement les contributions divergentes, correspondant au champ rayonné par la source d'intérêt, alors que la fonction de Bessel sphérique  $j_n$  permet la reconstruction

des contributions perturbatrices et de la réverbération de l'environnement.

$$\begin{cases} p(a_1, \theta, \phi) = \sum_{\substack{n \leq m \\ (n+m) \text{ paire}}} \left( \alpha_{nm} h_n^{(2)}(ka_1) + \beta_{nm} j_n(ka_1) \right) Y_n^m(\theta, \phi) \\ p(a_2, \theta, \phi) = \sum_{\substack{n \leq m \\ (n+m) \text{ paire}}} \left( \alpha_{nm} h_n^{(2)}(ka_2) + \beta_{nm} j_n(ka_2) \right) Y_n^m(\theta, \phi) \end{cases} \quad (2)$$

Cette phase de "déréverbération" et de "débruitage" des données mesurées permet une modélisation précise de l'environnement numérique considéré pour le calcul de rétro-propagation. Les fonctions de Green à prendre en compte pour la détermination de l'intégrale de Helmholtz-Kirchhoff sont donc les fonctions de Green champs libre (Eq. 3), où  $\cos(\gamma_s) = \frac{(\vec{r}_s - \vec{r}') \cdot \vec{n}_s}{|\vec{r}_s - \vec{r}'|}$ .

$$\begin{cases} G(\vec{r}_s, \vec{r}', -t) * \frac{\partial p_m(\vec{r}_s, -t)}{\partial n_s} = \frac{1}{4\pi|\vec{r}_s - \vec{r}'|} \times \frac{\partial p_m\left(\vec{r}_s; -t - \frac{|\vec{r}_s - \vec{r}'|}{c}\right)}{\partial n_s} \\ \frac{\partial G(\vec{r}_s, \vec{r}', -t)}{\partial n_s} * p_m(\vec{r}_s, -t) = \frac{\cos(\gamma_s)}{4\pi|\vec{r}_s - \vec{r}'|^2} \times p_m\left(\vec{r}_s; -t - \frac{|\vec{r}_s - \vec{r}'|}{c}\right) \\ + \frac{\cos(\gamma_s)}{4\pi c|\vec{r}_s - \vec{r}'|} \times \frac{\partial p_m\left(\vec{r}_s; -t - \frac{|\vec{r}_s - \vec{r}'|}{c}\right)}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 intégration de surface

Le processus d'imagerie par retournement temporel nécessite la connaissance du champ de pression complet  $\left(p_m(\vec{r}_s, t); \frac{\partial p_m(\vec{r}_s, t)}{\partial n_s}\right)$  sur une surface fermée. Il a été montré à travers la littérature que l'utilisation d'une quadrature définie à partir des noeuds et poids de Lebedev est un moyen efficace de réaliser une opération d'intégration au niveau d'une surface sphérique [4][5]. Afin de déterminer précisément l'intégrale de Helmholtz-Kirchhoff, nous proposons de propager numériquement le champ de pression "débruité" au niveau d'une sphère dont le rayon est plus important que celui de l'antenne de mesure, évitant ainsi des effets de bords au moment de l'opération de rétro-propagation du champ.

## 2.4 Puits à retournement temporel

L'imagerie acoustique par retournement temporel, ayant une résolution intrinsèquement limitée [1], nous proposons une troisième amélioration. En effet, durant la phase de rétro-propagation, les ondes ré-émises focalisent, dans un premier temps, au niveau du point source puis, dans un second temps, continuent leur progression, donnant naissance à des contributions divergentes qui limitent la résolution de l'image obtenue [6] [7]. Parmi les différentes méthodes existantes dans la littérature, nous pouvons citer la

méthode MUSIC [8], la méthode DORT [9] ou encore la technique du puits à retournement temporel [10]. Nous proposons d'utiliser une technique basée sur celle du puits à retournement temporel, qui consiste à définir, par recherche automatique de maximum dans le champ de pression reconstruit, une source numérique créant des interférences avec les contributions divergentes pré-citées.

### 3 Résultats

Afin d'illustrer les performances du processus d'imagerie par retournement temporel présenté dans ce papier, nous réalisons une mesure de champ de pression en environnement fortement réverbérant et bruité.

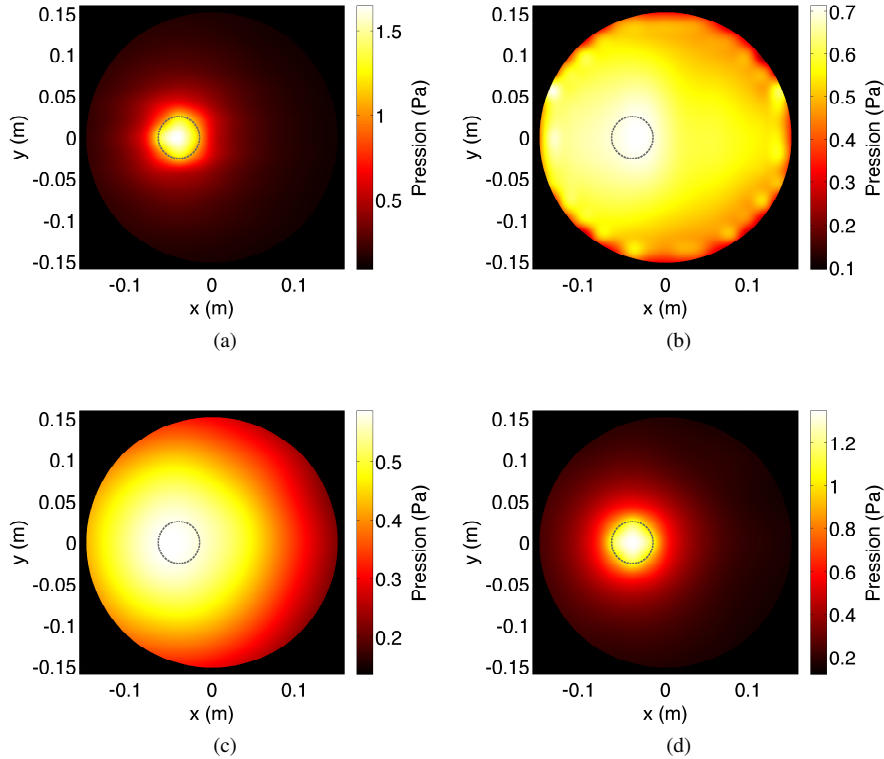


Figure 3: (a) Champ efficace de référence - (b) Champ efficace reconstruit par retournement temporel double couche sans l'utilisation de la FSM - (c) Champ efficace reconstruit par retournement temporel avec la quadrature de Lebedev et avec l'utilisation de la FSM - (d) Champ efficace reconstruit par retournement temporel avec la quadrature de Lebedev, avec l'utilisation de la FSM et du puits à retournement temporel

La figure 3 présente le champ de pression reconstruit aux différentes étapes du

processus complet. Dans le cas où aucune amélioration n'est utilisée, le champ rétro-propagé est fortement bruité (figure 3b). Il est presque impossible d'en obtenir une quelconque information sur la nature et la position exacte de la source d'intérêt. L'application de la méthode de séparation de champs (figure 3c) améliore grandement la qualité de l'image obtenue, mettant, dans le même temps, en évidence une résolution limitée. Pour obtenir une reconstruction efficace et précise dans les domaines du temps et de l'espace, nous définissons de manière automatique un puits à retournement temporel (figure 3d). Ces champs de pression reconstruits aux différentes étapes du processus d'imagerie sont comparés au champ de pression de référence (figure 3a), mesuré en chambre anéchoïque sans source perturbatrice.

Nous constatons alors que le processus d'imagerie par retournement temporel complet permet une caractérisation précise de la source acoustique malgré les conditions de mesures défavorables (environnement fortement réverbérant et bruité).

## References

- [1] M. Fink, D. Cassereau, A. Derode, C. Prada, P. Roux, M. Tanter, *Time-reversed acoustics*. Rep. Prog. Phys. (2000) 1933-1995.
- [2] M. Melon, C. Langrenne, P. Herzog, A. Garcia, *Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms*. J. Acoust. Soc. Am. (2010) 256-263.
- [3] Y. Braïkia, M. Melon, C. Langrenne, É. Bavu, A. Garcia, *Evaluation of a separation method for source identification in small spaces*. J. Acoust. Soc. Am. (2013) 323-331.
- [4] V.I. Lebedev, *Values of the nodes and weights of quadrature formulas of Gauss-Markov type for a sphere from the ninth to seventeenth order of accuracy that are invariant with respect to an octahedron group with inversion*. USSR Comp. Math. Math+ (1975) 48-54.
- [5] C. Ahrens, G. Beylkin, *Rotationally invariant quadratures for the sphere*. Proc. R. Soc. A. (2009) 3103-3125.
- [6] J. de Rosny, M. Fink, *Overcoming the diffraction limit in wave physics using a time-reversal mirror and a novel acoustic sink*. Physical Review Letters (2002) 219901.
- [7] É. Bavu, C. Besnainou, and V. Gibiat, J. de Rosny, and M. Fink, *Subwavelength sound focusing using a time-reversal acoustic sink*. Acta Acust. United Ac. (2007) 706-715.
- [8] F. K. Gruber, E. A. Marengo, A. J. Devaney, *Time-reversal imaging with multiple signal classification considering multiple scattering between the targets*. J. Acoust. Soc. Am. (2004) 3042-3047.

- [9] N. Mordant, C. Prada, M. Fink, *Highly resolved detection and selective focusing in a waveguide using the D.O.R.T. method*. J. Acoust. Soc. Am.(1999) 2634-2642.
- [10] E. Bavu and A. Berry, *Super-resolution imaging of sound sources in free field using a numerical time-reversal sink*. Acta Acust. United Ac. (2009) 595-606.